

煤矿智能化采煤工作面设备协同控制与调度策略

霍浩浩

陕西华电榆横煤电有限责任公司，陕西榆林，719000；

摘要：为解决传统煤矿采煤工作面设备协同性差、调度效率低、安全风险高问题，推动煤矿向智能化、无人化转型，本文对煤矿智能化采煤工作面设备协同控制与调度策略进行研究。首先，分析设备组成与协同控制核心需求，阐述关键技术基础；其次，剖析异构设备兼容、动态工况适应、多目标优化冲突等核心问题；最后，从协同控制体系架构、动态调度模型、安全保障机制三方面，提出分层协同控制架构，构建多目标优化调度模型，设计融合预测性维护的安全调度策略。经仿真实验与现场应用验证，该策略可提升设备协同效率 23.5%，降低设备故障率 18.2%，为煤矿智能化采煤工作面高效安全运行提供理论与技术支持。

关键词：煤矿智能化；采煤工作面；设备协同控制

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.018

引言

煤炭在我国能源体系中居核心支柱地位，其安全高效开采关乎国家能源安全与经济稳定。《十四五能源领域科技创新规划》推进下，煤矿智能化成破解传统煤矿困局的核心路径。采煤工作面是煤炭开采核心场景，汇集多种关键设备，设备协同运作效率决定其生产与安全水平。传统采煤工作面设备控制多为单机独立控制+人工干预，存在三大问题：一是设备信息孤岛严重，采煤机与液压支架不同步，增加冒顶风险；二是调度决策依赖人工经验，对动态工况响应滞后，易致生产中断；三是多目标优化能力弱，难平衡生产、能耗与安全矛盾。所以，研究煤矿智能化采煤工作面设备协同控制与调度策略意义重大。

1 煤矿智能化采煤工作面设备组成及协同需求

1.1 核心设备组成及功能特性

智能化采煤工作面设备系统以三机为核心，辅以转载机、破碎机、皮带输送机及配套监测监控设备，构成完整的生产作业链路，各核心设备的功能特性具体如下：

采煤机作为破煤落煤的核心设备，其牵引速度、截割高度、滚筒转速等运行参数直接决定生产效率，需依据煤层厚度、硬度等地质参数动态调整；液压支架承担顶底板支护核心任务，需与采煤机运行轨迹精准协同，实现跟机移架，保障作业空间安全；刮板输送机作为煤炭转运关键设备，需与采煤机落煤节奏精准匹配，同时规避与液压支架的动作干涉，其运行速度与负载状态直接影响生产连续性。此外，转载机、破碎机等后续设备需与刮板输送机形成高效转运协同，确保煤炭输送畅通

高效。

1.2 设备协同控制核心需求

智能化采煤工作面设备协同控制的核心需求，可概括为精准同步、动态适应、安全优先、高效节能四个维度。精准同步需求体现为设备动作的时空协同，例如液压支架移架速度需与采煤机牵引速度高度匹配，误差控制在 0.5m 以内，有效规避支护空窗期风险；动态适应需求要求系统能实时响应地质条件变化（如煤层倾角突变、夹矸出现）与设备状态波动（如电机负载异常、液压系统泄漏），快速调整设备运行参数；安全优先需求强调在协同控制中优先保障人员与设备安全，如监测到瓦斯浓度超标时，需立即触发设备紧急停机序列，防止事故扩大；高效节能需求则要求通过优化调度策略，在保障生产效率的同时降低设备能耗，例如依据煤炭产量需求动态调整设备运行功率，减少无效能耗。

2 煤矿智能化采煤工作面设备协同控制技术基础

2.1 工业互联网感知与传输技术

实现全场景数据的实时感知与可靠传输，是设备协同控制的首要前提，工业互联网技术为此提供了核心支撑。在感知层，通过在各设备关键部位部署振动传感器、温度传感器、压力传感器及视觉摄像头，实现设备运行参数（如电机转速、液压压力）、地质参数（如煤层厚度、顶板压力）与环境参数（如瓦斯浓度、粉尘浓度）的多源数据采集，数据采集频率可达 100Hz，确保参数监测的实时性与准确性。

在传输层，构建 5G+工业以太网双模传输网络：5G

网络凭借低时延（端到端时延 $\leq 20\text{ms}$ ）、大连接特性，实现采煤机等移动设备与控制中心的无线通信；工业以太网则保障液压支架、刮板输送机等固定设备之间的高速有线互联，二者通过边缘网关完成数据融合与协议转换，确保多源数据高效传输至控制中心，为协同决策提供全面数据支撑。

2.2 边缘计算与云计算协同处理技术

智能化采煤工作面设备控制对实时性要求极高，单一云计算模式难以满足毫秒级响应需求，因此采用边缘计算+云计算协同处理架构。边缘计算节点部署于工作面附近的控制箱内，负责处理采煤机与液压支架跟机控制、设备故障实时诊断等实时性要求高的任务，通过本地数据处理减少传输时延，响应时间控制在 50ms 以内；云计算平台部署于地面控制中心，负责处理长期生产计划制定、多工作面设备调度协调、大数据分析与管理训练等全局优化任务，通过海量数据挖掘优化协同控制策略，实现本地实时控制+全局优化调度的有机结合。

2.3 人工智能与优化算法支撑

人工智能与优化算法是实现设备协同智能调度的核心技术支撑。采用 BP 神经网络构建设备状态预测模型，通过历史运行数据训练模型，实现对采煤机截割负载、液压支架支护压力等关键参数的精准预测，预测误差控制在 5% 以内；运用遗传算法与粒子群优化算法融合的混合优化算法，构建多目标调度模型，实现生产效率、能耗、安全风险等目标的最优平衡；引入强化学习算法，使系统通过与动态工况的持续交互自主优化调度策略，提升对复杂场景的适应能力。

3 煤矿智能化采煤工作面设备协同控制与调度关键问题

3.1 异构设备协同兼容问题

由于煤矿设备采购周期不同、生产厂家各异，智能化采煤工作面存在大量异构设备，主要体现在两方面：一是通信协议不统一，如液压支架多采用 CANopen 协议，采煤机采用 Profinet 协议，刮板输送机采用 Modbus 协议，导致设备间数据交互受阻；二是控制逻辑差异显著，不同厂家设备的控制参数、响应机制各不相同，例如部分液压支架移架速度调节范围为 $0.3\text{--}0.8\text{m/s}$ ，而采煤机牵引速度调节范围为 $0.5\text{--}3\text{m/s}$ ，增加了协同控制难度。异构设备的兼容问题，已然成为制约设备协同效率提升的核心瓶颈。

3.2 动态工况下的调度适应性问题

煤矿井下地质条件复杂多变，动态工况对设备调度策略的适应性提出极高要求。一方面，煤层厚度变化、夹矸层出现等地质参数突变，会导致采煤机截割负载骤增，若调度策略未能及时调整，易引发采煤机卡刀、电机过载等故障；另一方面，液压支架泄漏、刮板输送机断链等设备突发故障，会打破原有协同节奏，若调度系统响应滞后，将延长生产中断时间。此外，临时提升煤炭产量等生产任务调整，也需调度策略快速优化设备运行参数，而传统依赖固定规则的调度策略，难以适配上述动态复杂场景。

3.3 多目标优化冲突问题

设备协同控制与调度涉及生产效率、安全风险、设备能耗、维护成本等多项目标，各目标间存在显著冲突。例如，提升采煤机牵引速度可提高生产效率，但会增加设备负载与能耗，同时可能导致液压支架跟机不及时，提升顶冒风险；降低刮板输送机运行速度可减少能耗，却易造成煤炭堆积，影响生产连续性。传统调度策略多采用单目标优化模式，如仅以生产效率为核心目标，易忽视安全与能耗问题，难以实现多目标协同优化，制约了智能化采煤工作面综合效益的提升。

4 煤矿智能化采煤工作面设备协同控制与调度策略设计

4.1 基于工业互联网的分层协同控制架构

为解决异构设备兼容问题，构建感知层-网络层-控制层-应用层四层协同控制架构，实现设备无缝协同与数据高效互通。感知层用标准化传感器接口，智能传感器转换运行参数，边缘网关采集预处理；网络层构建协议转换与数据融合传输机制，统一异构协议，用 5G 与工业以太网双模网络传输数据；控制层分边缘控制节点与云端控制中心，二者协同决策；应用层提供功能模块和可视化界面。架构重点设计异构设备适配模块，建立标准化信息模型，实现多设备适配。以液压支架与采煤机协同控制为例，通过模型库统一控制逻辑，关联映射调节范围，确保协同精准同步。

4.2 动态工况下的多目标优化调度模型

针对动态工况适应性与多目标优化冲突问题，构建基于混合优化算法的动态调度模型，协同优化生产效率、安全风险和设备能耗。模型以最大化生产效率、最小化安全风险和设备能耗为目标函数，有设备运行、地质条件、安全阈值等约束条件。算法采用 GA-PSO 混合算法，提升优化效率。具体步骤：①边缘计算节点实时采集数

据,判断工况是否变化;②工况稳定用预优化参数调度,工况突变触发动态优化流程;③GA-PSO算法优化调度参数,输出最优参数;④边缘控制节点下发参数完成调度。为提升模型适应能力,引入强化学习机制,使模型自主优化调度策略,增强对复杂工况的适应。5.3 融合预测性维护的安全调度保障机制

以安全优先为核心原则,构建状态监测-故障预测-应急调度的安全保障机制,融合预测性维护与设备调度,降低安全风险。状态监测时,用多源传感器采集设备参数,结合视觉识别技术监测外观缺陷,全面感知设备状态;故障预测时,采用BP神经网络建模型,用历史故障数据训练,提前10-15分钟预测液压支架泄漏、采煤机电机故障等问题,为应急调度留时间;应急调度时,制定分级响应机制,一级响应(如瓦斯浓度超标)触发设备紧急停机,保障人员安全;二级响应(如设备轻微故障)调度备用设备或调整相邻设备参数维持生产,如液压支架故障时调度两侧支架扩大支护范围,降低采煤机牵引速度。建立安全与调度联动机制,以安全阈值约束调度参数,超阈值时强制调整调度策略,确保安全优先,实现安全可控下的高效生产。

5 系统实现与应用验证

基于上述策略,开发煤矿智能化采煤工作面设备协同控制与调度系统。系统采用C#语言开发,结合MATLAB实现算法优化,数据库选用MySQL存储设备运行数据与调度参数。系统部署分为井下与地面两部分:井下部部署边缘控制节点、传感器及通信设备,完成数据采集与实时控制;地面部署云端控制中心与监控平台,实现全局调度与可视化管理。系统支持1000+设备同时接入,数据传输时延 $\leq 20\text{ms}$,满足智能化采煤工作面的实时控制需求。

将系统应用于某煤矿智能化采煤工作面,该工作面长度200m,煤层厚度2.5-3.2m,配备1台采煤机、100架液压支架、1台刮板输送机及配套转运设备。验证周期为3个月,通过对比系统应用前后的设备协同效率、故障发生率、生产效率与能耗指标,验证所提策略的有效性。验证指标包括设备协同误差(采煤机与液压支架动作同步误差)、设备故障率、月均煤炭产量、单位产量能耗。其中,设备协同误差采用激光测距仪测量,设备故障率通过统计各设备故障次数与运行时间的比值计算,单位产量能耗通过电能表测量总能耗与煤炭产量的比值确定。

应用验证结果表明,系统应用后各指标均显著改善:

设备协同误差从1.2m降至0.3m,协同精度提升75%,有效解决了支护滞后问题;设备故障率从3.2次/月降至2.6次/月,降低18.2%,其中采煤机卡刀故障改善最为明显,从1.1次/月降至0.4次/月;月均煤炭产量从4.5万吨提升至5.55万吨,生产效率提升23.5%;单位产量能耗从8.2kWh/吨降至6.8kWh/吨,能耗降低17.1%。动态工况测试中,模拟煤层厚度从2.8m降至2.2m的突变场景,系统在30ms内完成调度参数调整,采煤机截割高度同步降低,未出现负载过载等异常问题;模拟某台液压支架泄漏故障时,系统在1分钟内调度相邻支架扩大支护范围,同时通知维护人员,生产中断时间从40分钟缩短至15分钟,充分验证了系统对动态工况的良好适应性。

6 结论

针对煤矿智能化采煤工作面设备协同控制与调度问题,分析设备组成与协同需求,明确异构设备兼容、动态工况适应、多目标优化冲突三大核心问题,提出基于工业互联网的分层协同控制架构、动态多目标优化调度模型及融合预测性维护的安全保障机制,主要研究结论如下:四层协同控制架构通过标准化信息模型与协议转换技术,解决异构设备兼容问题,实现设备数据互通与精准协同,协同误差控制在0.3m以内;基于GA-PSO混合算法的多目标调度模型,协同优化生产效率、安全风险与能耗,使生产效率提升23.5%,能耗降低17.1%;融合预测性维护的安全保障机制,提前预测设备故障并应急调度,使设备故障率降低18.2%,缩短生产中断时间,提升工作面安全运行水平。本文研究为设备协同控制提供有效方案,但存在不足,未来可从三方向深化研究:一是引入数字孪生技术,构建虚拟仿真模型,通过虚拟调试优化调度策略;二是提升算法自学习能力,结合联邦学习技术协同优化多工作面调度策略;三是拓展协同控制范围,将掘进、运输等设备纳入协同体系,实现全矿井设备全局优化调度,推动煤矿智能化发展。

参考文献

- [1]陈波,王常虹.网络控制系统中控制与调度的协同设计策略[C]//中国控制会议.2005.
- [2]苏刚,刘昇鑫,乙安鹏,等.泵站群智能化调度与电气设备协同控制策略研究[J].建筑与施工,2025(12).
- [3]傅伟根,崔建华,傅栋.基于智能化控制的大气污染治理设备[C]//第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(三).2025.